

DOI: 10.17551/2358-1778/geoamazonia.n1v2p33-55

Flávio Augusto Altieri dos SANTOS & Edson José Paulino da ROCHA

ALAGAMENTO E INUNDAÇÃO EM ÁREAS URBANAS. ESTUDO DE CASO: CIDADE DE BELÉM

Flávio Augusto Altieri dos SANTOS¹
Edson José Paulino da ROCHA²

33

Resumo

Esse estudo objetivou desenvolver e testar um sistema de previsão de alagamento e inundação em bacias urbanas, através do desenvolvimento de um modelo hidrológico que incorporasse as características físicas da bacia (modelo digital do terreno, escoamento superficial e vazão do canal principal), da análise do regime das marés e do dado meteorológico referente ao tempo de duração e intensidade da chuva. A base de dados foi sistematizada e integrada a um banco de dados geográficos para serem acessados a partir de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os resultados obtidos indicam que é possível através de um modelo hidrológico acoplado as previsões meteorológicas de "Nowcasting" prever a ocorrência de alagamentos e inundações em bacias urbanas com objetivo de gerar alerta de curto prazo de forma eficiente e eficaz a população direta e indiretamente afetada.

Palavras-Chave: Modelagem Hidrológica, Sistema de Alerta de Enchentes, Sistema de Informações Geográfica, Belém

FLOODING IN URBAN AREAS. CASE STUDY: TOWN OF BELÉM

Abstract

This study aimed to develop and test a system for forecasting flooding in urban watersheds, through the development of a hydrological model that incorporates the physical characteristics of the basin (digital terrain model, surface runoff and flow from the main channel), the analysis of tidal regime and meteorological data in relation to the duration and intensity of the rain. The database was systematized and integrated into a geographic database to be accessed from a Geographic Information System (GIS). The results indicate that it is possible through a hydrological model coupled meteorological forecasts "Nowcasting" predict the occurrence of floods in urban watersheds in order to generate short-term alert efficiently and effectively direct and indirectly affected population.

INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS, ESTUDIO DE CASO: CIUDAD DE BELÉM

Resumen

Este estudio tiene como objetivo desarrollar y probar un sistema de previsión de inundaciones en cuencas urbanas, a través del desarrollo de un modelo hidrológico que incorpora las características físicas de la cuenca (modelo digital de terreno, escurrimiento superficial y de flujo del canal principal), el análisis de régimen de mareas y datos meteorológicos en relación con la duración y la intensidad de la lluvia. La base de datos fue sistematizada e integrada en una

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental. Sistema de Proteção da Amazônia – SIPAM. e-mail: flavioaltieri@yahoo.com.br

² Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental. e-mail: eprocha@ufpa.br

base de datos geográfica para acceder desde un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados indican que es posible a través de un modelo hidrológico pronósticos meteorológicos acoplados " predicción inmediata " a predecir la ocurrencia de inundaciones en cuencas urbanas con el fin de generar la alerta a corto plazo con eficiencia y eficacia directa e indirectamente a la población afectada.

Palabras clave: Hidrología, Flood Alert System, Sistema de Información Geográfica, Modelando Belém

INTRODUÇÃO

Os eventos naturais extremos que mais repercutem nas atividades humanas no nosso país são de natureza climática. Embora seja fenômenos naturais, a atuação do homem interferindo nas áreas urbanas ou rurais, ao longo do tempo, tem contribuído para sua maior frequência, intensidade e expansão areolar (BRANDÃO, 1992, 2001).

Historicamente as cidades na Amazônia localizam-se às margens dos rios e neste contexto a cidade de Belém não é diferente, a capital do Estado do Pará, é margeada pelo Rio Guamá e pela Baía do Guajará a uma altitude média de aproximadamente 10 m acima do nível do mar. Entretanto, segundo dados do Plano Diretor Urbano (PDU) de Belém, a concentração de grande parte da população ocorre onde à altitude da porção continental achase em áreas de cotas inferiores ou iguais a 4 metros, espaços tradicionalmente conhecidos por “baixadas”. Por esse motivo, estas áreas sofrem influência das bacias hidrográficas existentes no município, o que lhes impõem a condição de ocuparem terrenos alagados permanentemente, ou sujeitos a inundações periódicas.

Em 2010, segundo dados do último censo demográfico realizado pelo IBGE, a população de Belém já era de aproximadamente 1.393.399 habitantes, sinalizando para uma explosão demográfica que trás como consequência o efeito de um crescimento desordenado, através da ocupação de locais impróprios para moradia, como aqueles ambientes às margens dos igarapés que por influência de maré constantemente são alagados. Grande parte dos habitantes que ocupam estas áreas são pessoas de baixo poder aquisitivo.

O surgimento dessas áreas periféricas acentua a tendência à concentração da pobreza, criando dificuldade de ampliação das redes de infraestrutura; dificuldade de acesso aos equipamentos e serviços urbanos concentrados nas áreas mais nobres; alto custo no atendimento às necessidades destas áreas.

Segundo Coelho (2001), a incidência das inundações influencia a classe média e alta a se afastarem das áreas urbanas definidas como área de risco' fazendo com que a especulação

imobiliária sobre as áreas mais nobres da cidade pressione a população menos favorecida a ocuparem os ambientes naturais impróprios para moradia.

O processo de ocupação urbana, aliado a falta de planejamento de urbanização das cidades, tem como consequências: alterações no balanço de energia e alteração dos níveis de conforto urbano (elevação da temperatura e redução da umidade relativa). Além desses aspectos, o processo de urbanização impermeabiliza o solo proporcionando o aumento dos problemas relacionados às inundações que frequentemente afetam a população dessas áreas, tornando inevitável seu sofrimento por conta da perda de seus bens materiais e o aumento do risco de contaminação por doenças veiculadas por meios hídricos.

Segundo Tucci (2003), a maioria dos problemas relativos às inundações, é consequência de uma visão distorcida do controle por parte dos profissionais que ainda priorizam projetos localizados sem uma visão da bacia e dos aspectos sociais e institucionais das cidades. Observa-se que países em desenvolvimento e mais pobres, priorizam ações insustentáveis economicamente como as medidas estruturais, enquanto os países desenvolvidos buscam prevenir os problemas com medidas não estruturais (educação, participação pública, legislação etc.) mais econômicas e com sustentabilidade ambiental. Como a maioria das soluções sustentáveis passa por medidas não estruturais que envolvem restrições à população, dificilmente o Poder Público responsável pela gestão municipal busca soluções deste tipo, pois na maioria das vezes, ela implica na implementação de ações que interferem nos interesses dos proprietários dessas áreas de risco, que politicamente é complexo e não é bem visto pelos mesmos.

Com o passar do tempo, o processo de urbanização das regiões metropolitanas deixaram de crescer no seu centro, e passam a se expandir na periferia, justamente onde se concentram os mananciais, agravando este problema. Isso evidencia que a vulnerabilidade aos desastres naturais está associada não só aos aspectos relacionados ao meio físico como, por exemplo: clima, relevo, drenagem, solos, etc., mas, sobretudo, à situação socioeconômica da população localizada nos ambientes próximos aos leitos fluviais (MONTEIRO, 1991).

Em meados do século XX, segundo o Boletim SESP (apud, BRASIL, 1943), que, objetivando controlar o problema das enchentes nas áreas mais baixas da Cidade de Belém, foram realizadas várias obras, entre elas um dique, cuja parte principal, com cerca de 6 km coincide com o trecho hoje denominado Avenida Bernardo Sayão. Outros 10 km foram construídos, quando possível, considerando todas as estradas ou trabalhos feitos

anteriormente, além de um sistema de drenagem para a cidade. O dique construído expande-se do igarapé Tucunduba até o igarapé de Val-de-Cans, com uma distância aproximada de 16 km. Esta obra impediu a Inundação de uma área de 38.540 m², e a área beneficiada pelo sistema de drenagem foi de 98.270.000 m².

Além da construção do dique, foram realizadas umas séries de obras como a construção de um canal pavimentado de 6 km, que inicia próximo a área da Universidade e se estende até o igarapé do Arsenal, e mais 4 canais laterais: Canal da Quintino Bocaiúva, Canal da Timbiras, Canal da Tamandaré e Canal de Val-de-Cans. A finalidade desses canais laterais seria de drenar a áreas sujeitas à inundação por causa das chuvas. Deve-se dizer que na época da inauguração desses canais, apenas o de Val-de-Cans não era pavimentado e todos foram equipados com comportas de funcionamento automático para evitar a entrada da água das marés altas, entretanto, atualmente esta condição não é observada.

Os espaços urbanizados cada vez mais sofrem com as alterações causadas a partir de intervenções provocadas pelo homem, principalmente pela falta de planejamento da ocupação urbana adequada e ausência de áreas verdes. Grande parte desse problema ocorre pela substituição das áreas verdes por casas e prédios, ruas e avenidas e uma série de outras construções, que é tanto maior quanto mais se aproxima do centro das grandes cidades, fazendo aumentar significativamente a irradiação de calor para a atmosfera em comparação com as zonas periféricas ou rurais, onde, em geral, é maior a cobertura vegetal. Além desse problema, nas áreas mais centrais da cidade, se registra também, uma maior concentração de gases e materiais particulados suspensos no ar, lançados principalmente pelos automóveis e pelas fábricas, proporcionando o aparecimento do “efeito estufa” localizados, colaborando para a formação de ilhas de calor urbanas. Este fenômeno é considerado o exemplo mais evidente de mudança climática provocada pelo homem, e que tem sido um dos temas mais abordados nos últimos anos, devido sua ocorrência em praticamente todas as cidades do mundo. Segundo LOMBARDO (1985), essas mudanças climáticas elevam a temperatura, provocando uma baixa na pressão atmosférica, gerando uma circulação local, contribuindo para a concentração da massa úmida existente no entorno e provocando anomalias na precipitação sobre estas áreas.

Desta forma, a expansão das áreas urbanas proporciona a formação de diferentes microclimas no interior e ao redor dos espaços urbanos, conforme observado em diversos estudos realizados (LOMBARDO, 1985).

A cidade de Belém pela sua localização geográfica, circundada pela baía do Guajará e pelo Rio Guamá, tem reflexos por conta do problema da ocupação urbana desordenada, influenciada principalmente pela perda dos seus últimos remanescentes de vegetação e pela impermeabilização do solo.

Os estudos deste trabalho objetivou desenvolver e testar um sistema de suporte a gestão e decisão de alagamento e inundação em bacias urbanas, através do desenvolvimento de um modelo hidrológico que incorporasse as características físicas da bacia (modelo digital do terreno, escoamento superficial e vazão do canal principal), da análise do regime das marés e dos dados de intensidade de chuva estimados por radar meteorológico. A base de dados foi sistematizada e integrada a um banco de dados geográficos para serem acessados a partir de um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo contempla uma bacia hidrográfica urbana localizada no município de Belém, às margens do Rio Guamá, a uma altitude média de 6 m em relação ao nível do mar e que corresponde a uma área de drenagem de aproximadamente 4,69 km².

O Modelo Digital de Elevações (MDE) foi gerado a partir das cotas altimétricas do terreno correspondente ao voo aerofotogramétrico contatado pela CODEM e interpolado através do método de krigagem ordinária.

Os dados de chuvas para validação do modelo foram obtidos da estação meteorológica do INMET, para algumas das datas em que ocorreram alagamento e inundações na área de estudo. A variação do nível da maré do Rio Guamá foi determinada a partir do aplicativo wxtide32 (<http://www.wxtide32.com>), devidamente calibrado para as variações das marés do Rio Guamá, e comparado com os dados da tábua de maré calculados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil.

A determinação da vazão máxima do canal de drenagem principal da bacia, foi feita a partir de duas medições de campo na secção transversal da bacia (figura 1), sendo uma no período mais chuvoso (março) e outra no menos chuvoso (agosto), objetivando determinar as variáveis hidrológicas referente a morfologia e profundidade do fundo do canal, a área e perímetro da secção e da secção molhada e da velocidade do fluxo de água no canal.

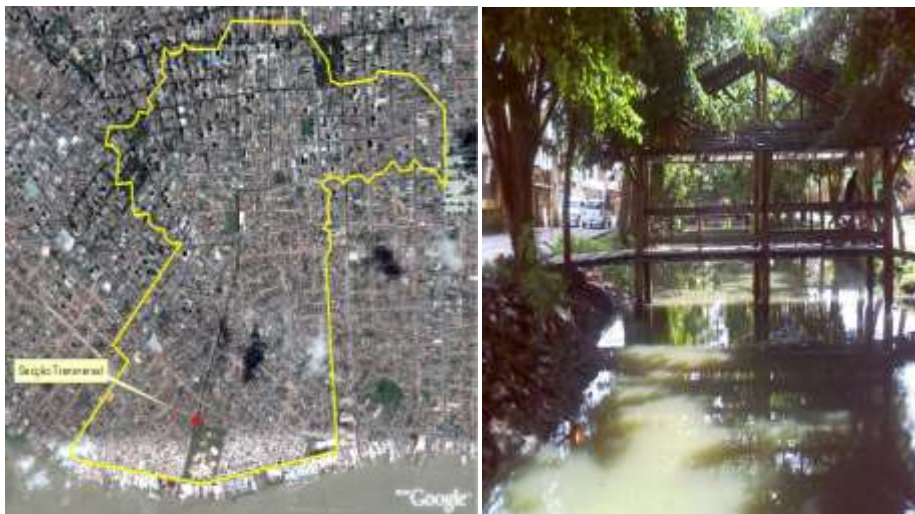


Figura 1: Local da seção transversal definida para realização das medições, localizado na Trav. Quintino Bocaiúva próximo a Pass. Carlos de Carvalho.

Vazão do canal

A determinação da vazão do canal foi realizada com base no método de levantamento por molinete, e a velocidade do fluxo calculada através da equação (1).

$$v = a + b \times n \quad (1)$$

Onde a velocidade, v , é dada em (m/s), o número de rotações da hélice, n , em (rps). As constantes a e b são obtidas através da calibração do molinete.

A partir da vazão parcial de cada perfil vertical (Q_{pi}) da seção transversal do canal, foi calculado a Vazão Total (Q_t) para o perfil transversal através da equação (2).

$$Q_t = \sum_i^n Q_{pi} \quad (2)$$

Onde, Q_t é a vazão total da seção transversal do canal; Q_{pi} é a vazão parcial da subseção da vertical “ i ” e, “ i ” o perfil vertical considerado.

Modelo hidrológico

O modelo hidrológico utilizado para rodar em ambiente computacional visando simular os eventos naturais que influenciam as inundações, foi determinado com base no entendimento dos componentes do balanço de água que ocorrem em uma bacia hidrográfica: precipitação, infiltração, capacidade de armazenamento de água no solo, evaporação/evapotranspiração e o escoamento superficial (figura 2).

Para a bacia em estudo assumiu-se como características que a precipitação ocorre sobre toda a bacia; a intensidade de chuva e o coeficiente de escoamento superficial são constantes; e, a vazão máxima só ocorre quando toda a bacia estiver contribuindo. Com base nisso, a determinação da vazão de pico foi feita utilizando a equação 3 que corresponde ao coeficiente de escoamento superficial. Onde C é o coeficiente de escoamento superficial; I é a intensidade máxima de precipitação (mm/h) para uma duração de tempo t , e A , a área da bacia (km²).

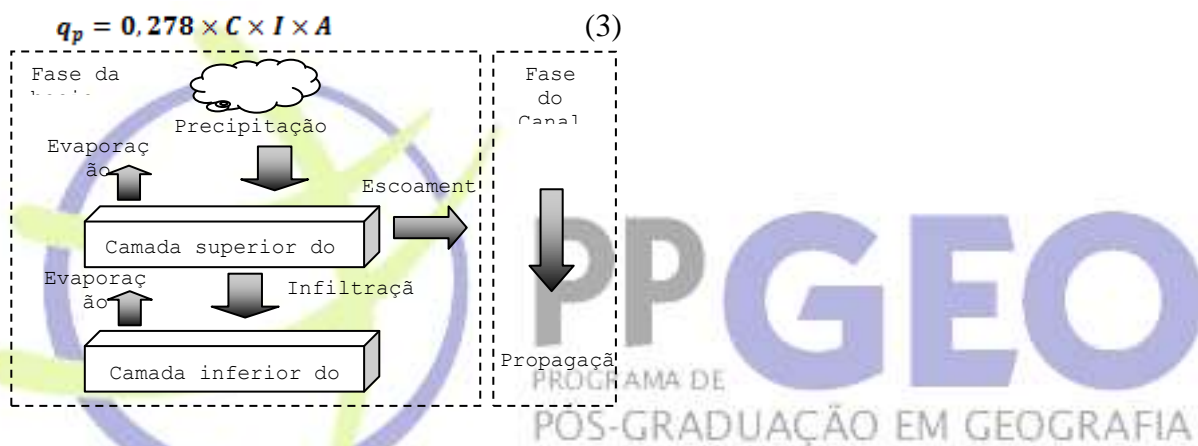


Figura 2: Representação do modelo de balanço de água.

O Coeficiente de deflúvio (C), ou coeficiente de escoamento superficial, ou coeficiente runoff é razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado. Este coeficiente pode ser relativo a uma chuva isolada ou relativo a um intervalo de tempo onde várias chuvas ocorreram. Para efeito de aplicação no modelo o coeficiente de escoamento superficial foi calculado a partir da equação 4 de Horner (apud: PINTO et al., 1975). A escolha da equação é devida o fato de que a bacia foi dividida em células de tamanho compatíveis ao detalhamento dos dados referente a situação atual de uso e ocupação do solo, o que permite uma melhor acurácia no cálculo desse coeficiente.

$$c = 0,364 \times \log(t_{ch}) + 0,0042 \times p - 0,145 \quad (4)$$

Onde t_{ch} é o tempo de duração da chuva em minuto e p , a percentagem impermeabilizada da área.

Para a quantificação do escoamento superficial, foi aplicado o método do hidrograma unitário instantâneo (HUI), representado pela equação 5, desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS, 1957), onde o hidrograma unitário é considerado um triângulo (figura 3).

Onde: q_p - o pico da vazão máxima; t_r - tempo de duração da chuva; t_p - tempo de pico da vazão contado do tempo de pico da chuva; t'_p - tempo de pico da vazão contado do início da precipitação; t_e - tempo de recessão, ou seja, o tempo necessário para a vazão baixar até sua condição normal; e t_b - tempo de base do hidrograma.

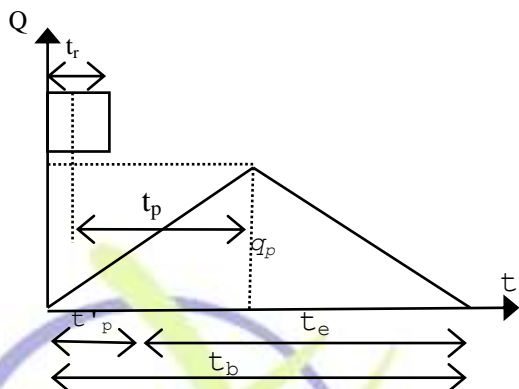


Figura 3: Hidrograma triangular SCS. Fonte: (Soil Conservation Service, 2008).

$$V_{escoado} = q_p \cdot \frac{t_b}{2} \quad (5)$$

Tempo de concentração (t_c) - é definido como o tempo necessário para uma partícula de água escoar do ponto mais distante da bacia para a seção exutório, também é definido como o intervalo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma (final do escoamento superficial). O cálculo de t_c é com base na fórmula do Califórnia Culvert Practice (equação 6).

$$t_c = 57 \times \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (6)$$

Onde: t_c - Tempo de Concentração em minutos; L - Comprimento do talvegue em km; e, H - Diferença de nível entre o ponto mais afastado da bacia e o ponto considerado, em metros.

O tempo de duração da chuva deve ser igual ao tempo de concentração da bacia, ou seja, ao tempo necessário para que toda área de drenagem passe a contribuir para a vazão na seção estudada.

Tempo do pico (t_p) - é definido como o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo de pico e será calculado com base na equação 7.

$$t_p = 0,5 \times t_r + 0,6 \times t_c \text{ (hora)} \quad (7)$$

Tempo de base (t_b) - é o tempo entre o início da precipitação e aquele em que a precipitação ocorrida já escoou através da seção principal, ou seja, aquele em que o canal já voltou a sua condição anterior ao da precipitação. O t_b foi calculado com base na equação 8.

$$t_b = 2,67 \times t_p \text{ (hora)} \quad (8)$$

Sistema de avaliação de risco

A área da bacia hidrográfica foi dividida em células 5 m x 5 m (25 m²), tamanho apropriado às simulações do modelo hidrológico proposto, buscando o equilíbrio entre precisão, disponibilidade de dados e esforço computacional (figura 4). Cada célula recebeu um identificador único e cada coluna passou a armazenar os atributos correspondentes as variáveis utilizadas na modelagem hidrológica (figura 4).

Para a entrada e processamento dos dados, foi desenvolvida uma interface amigável no próprio ambiente do SIG, capaz de aplicar as equações do modelo hidrológico definidas para o cálculo do escoamento superficial, da vazão do canal principal de drenagem da bacia, do volume de água resultante da precipitação e da cota de alagamento e inundação para a bacia hidrográfica, além de identificação e seleção das áreas impactadas.

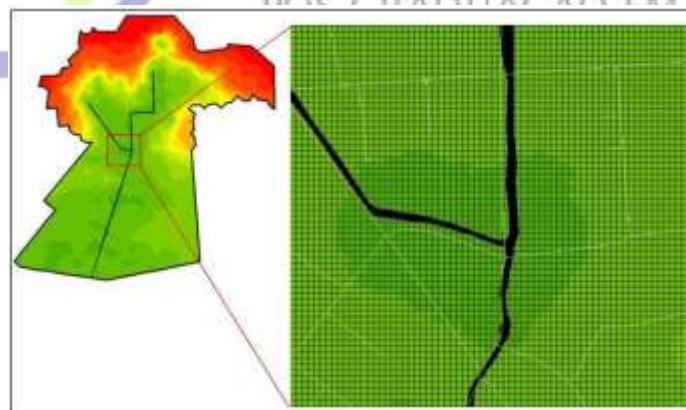


Figura 4: Representação da divisão da bacia para aplicação do modelo.

Figura 5: Tabela de atributos do dado espacial (grid) que contém os campos necessários para a execução do modelo hidrológico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As características do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica foram avaliadas com base nos do cadastro imobiliário da CODEM. Segundo esses dados, aproximadamente 79,26% da área encontra-se impermeabilizada com uso destinado a ocupação urbana, e o restante são áreas não edificadas, porém, que já perderam sua vegetação original (figura 6). Cerca de 1.967 dessas habitações estão localizadas em áreas sujeitas a alagamentos e 1.008 em áreas alagadas, sendo que, aproximadamente 947 dessas habitações são de construção de madeira. Aproximadamente 52,66 % da área total da bacia apresenta exposição do terreno para a direção Sul, no sentido da saída da bacia no Rio Guamá.

A altimetria da bacia varia entre 2,98 a 15,76 metros, sendo que 56,67% das variações altimétricas se concentram nas cotas abaixo de 4,50 metros localizadas em uma área plana, com uma variação de declividade muito pequena, sendo que a maior parte da área (53,97%) apresenta declividade abaixo de 0,5%. As áreas mais altas estão localizadas no extremo oposto da saída da bacia, fato que reduz o tempo de concentração, ou seja, o tempo em que leva para que toda a água proveniente da chuva sobre a bacia chegue ao seu ponto de saída, aumentando o risco de alagamento e inundação.

No mapa de orientação do fluxo de superfície obtido a partir do MDE é possível observar a orientação do terreno da bacia em valores agrupados com as oito principais direções cardinais. Aproximadamente 52,66% da área total da bacia apresenta exposição do terreno para a direção Sul, no sentido do Rio Guamá. Com base neste componente de análise, foi possível identificar a maioria dos pontos de alagamento, que são decorrentes da convergência do escoamento superficial no terreno (figura 7). Esta situação se agrava em razão de uma provável deficiência no sistema de drenagem pluvial subterrânea, proporcionando o alagamento dessas áreas em eventos de chuvas fortes.

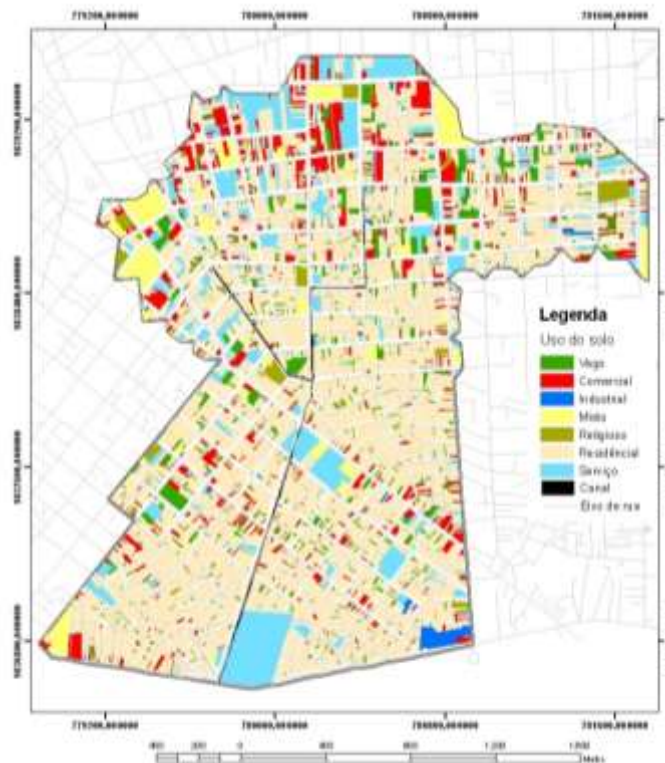


Figura 6: Mapa da distribuição espacial do uso e ocupação do solo na área do projeto. Fonte: (CODEM, 1988).

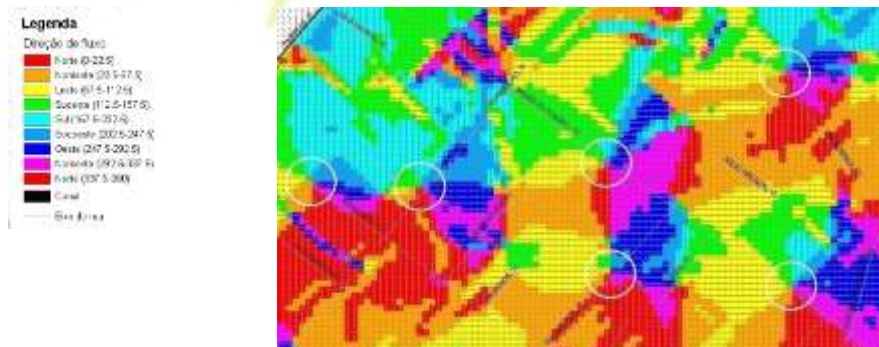


Figura 7: Identificação de pontos de alagamentos através da análise do mapa de orientação do fluxo terreno da bacia hidrográfica.

Análise de casos de inundações na bacia

Foram selecionados alguns dos episódios de alagamentos e inundações ocorridos em Belém para uma análise associada do comportamento da precipitação e da maré durante o período de ocorrência do primeiro evento.

Nos gráficos (a), (b) e (c) da figura 8 observa-se que as chuvas ocorreram no instante que o Rio Guamá (ponto de deságua da bacia), e o mesmo estava no seu nível máximo ou próximo dele, contribuindo para as ocorrências de alagamento e inundações. Entretanto,

apesar do nível da maré influenciar para o acontecimento desses eventos, o gráfico (d) da figura 8 observa-se que mesmo a chuva ocorrendo em condições de maré baixa, porém, se a intensidade for grande, acarretará problemas relacionados ao alagamento ou inundação na área da bacia.

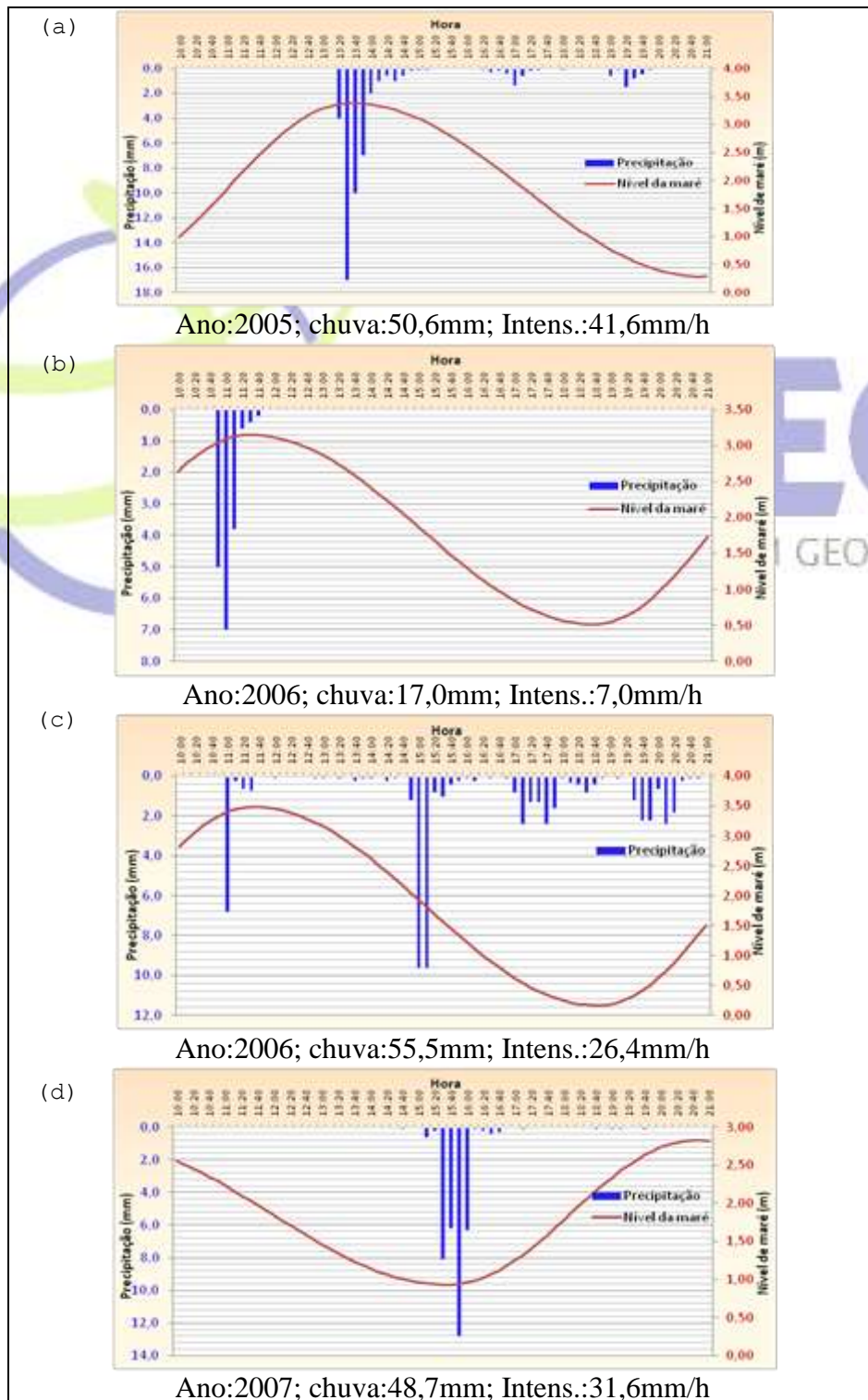


Figura 8: Dados pluviométricos e de marés.

Vazão do canal principal

A área calculada da vertical da secção transversal da bacia é de 18,94 m² e sua vertical da secção molhada é de 13,33 m². A determinação da vazão de saída da bacia no canal principal foi realizada para dois períodos distintos, um durante a estação mais chuvosa que ocorreu no dia 27/04/09, e a outra na estação menos chuvosa, no dia 22/08/09. Para as duas datas de coleta de campo, foram registradas tanto vazões positivas correspondentes ao fluxo de água saindo do canal em direção ao Rio Guamá, quanto vazões negativa referente ao fluxo de entrada de água na bacia no sentido do Rio Guamá para o canal. Isto ocorre devido o fato de não existir nenhum sistema de comporta funcionando para conter a entrada da água do rio durante a elevação do seu nível, induzida pelo efeito da maré oceânica. Este tipo de fenômeno varia entre localidades, especificamente em Belém, no Rio Guamá, segundo observações realizadas na régua instalada as variações entre uma baixa-mar e preamar é de aproximadamente 6h23min, e entre uma preamar e uma baixa-mar é de aproximadamente 7h37min.

Conforme mostra a tabela 1, a menor vazão registrada em termo de valor absoluto foi 0,58 m³/s, e ocorreu próximo de acontecer a inversão do fluxo da água do canal. Já a maior vazão registrada foi de 9,17 m³/s, consequência da precipitação de 40,70 mm registrada no dia da coleta de campo no intervalo de 13h20min às 15h40min. A intensidade máxima desta chuva foi de 18,80 mm/20min registrada em torno das 13h30min (figura 51).

Tabela 1. Vazões das verticais das secções molhadas calculadas para a data de 27/04/09.

| Hora | Vazão Total (m ³ /s) |
|-------|------------------------------------|
| 11:00 | 0,58 |
| 12:00 | -0,89 |
| 13:00 | -1,16 |
| 14:00 | 9,17 |
| 15:00 | 3,23 |
| 16:00 | 3,58 |
| 17:00 | 2,84 |
| 18:00 | 2,85 |

Na figura 9 é possível observar para o dia 27/04/2009, a influência do nível da maré do Rio Guamá sobre o comportamento da vazão e do nível do canal de drenagem da bacia. No momento que o rio atingiu a cota de 2,58 m ocorreu à inversão do fluxo, no sentido do rio ao

canal, e se manteve assim até o nível do rio voltar a baixar e atingir a cota de 3,21m às 13h15min.

O comportamento da vazão do canal para as condições de observação sem influência de chuva pode ser observado na tabela 2. O pico máximo de vazão ocorreu aproximadamente 1 (uma) hora após o nível da maré do Rio Guamá voltar a baixar, desobstruindo o fluxo da água represada no canal, e posteriormente transcorreu mais 2 (duas) horas para retornar à sua vazão normal (figura 10). Observa-se também, que o refluxo da água no canal (vazão negativa) dura aproximadamente 2 (duas) horas. Este dado é de grande importância na construção do processo de modelagem do risco de alagamento e inundação é proposta para a área da bacia. Este fato aumenta a potencialidade da ocorrência desses eventos para os casos em que precipitação coincide com o nível de maré alta.

46

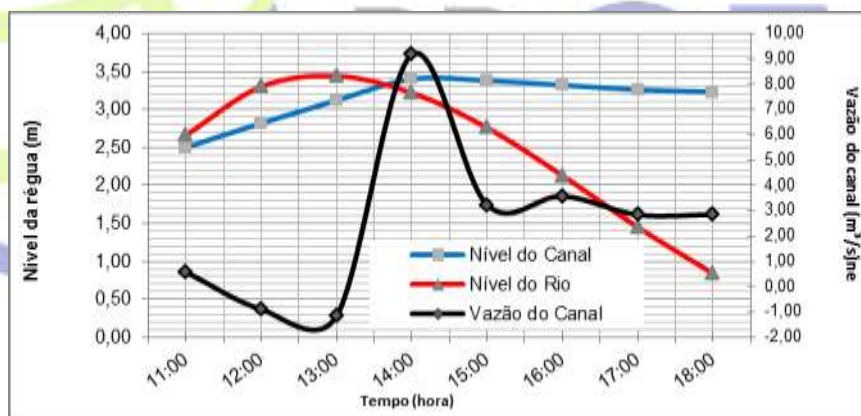


Figura 9: Comportamento da vazão e do nível do canal em relação ao nível da maré referente à data de 27/04/09.

A figura 11 mostra a correlação existente entre o comportamento da vazão do canal com o seu nível durante um ciclo de maré.

Tabela 2. Vazões das verticais das secções molhadas calculadas para a data de 27/04/09.

| Hora | Vazão Total (m³/s) |
|-------|--------------------|
| 9:00 | 0,57 |
| 10:00 | 0,62 |
| 11:00 | 0,47 |
| 12:00 | -0,80 |
| 13:00 | -0,67 |
| 14:00 | 1,44 |
| 15:00 | 1,91 |
| 16:00 | 1,67 |
| 17:00 | 0,60 |

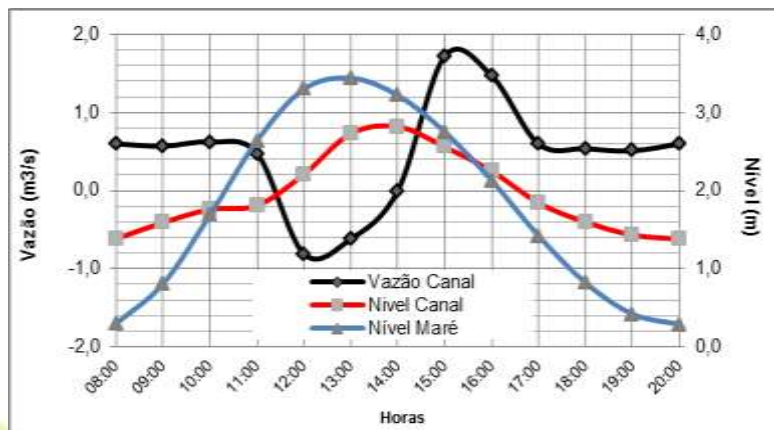


Figura 10: Gráfico demonstrativo do comportamento do nível e vazão do canal e função da variação do nível da maré do Rio Guamá.

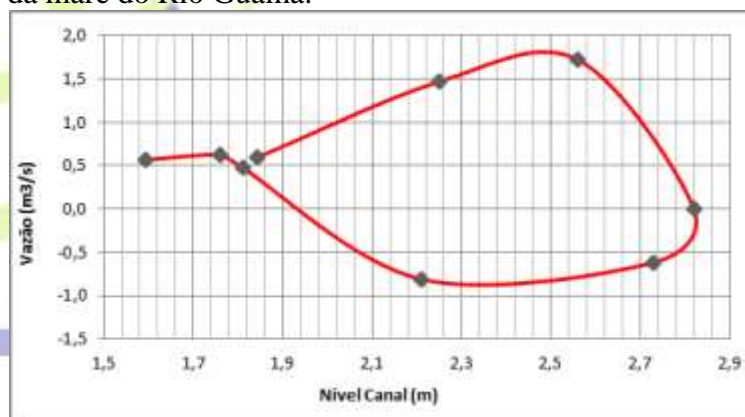


Figura 11: Gráfico demonstrativo da vazão do canal para o dia 22/08/2009 durante um ciclo de maré.

Análise de sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade é uma etapa importante para a validação do modelo hidrológico. A partir do conhecimento da influência dos parâmetros nos resultados do modelo é possível determinar melhorias para aplicações futuras. Em razão disso, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo hidrológico para a intensidade máxima da chuva e vazão máxima do canal. A análise teve como base os dados do evento pluviométrico ocorrido na data de 27/04/2009, onde a precipitação registrada foi de 38 mm e a duração da chuva de 90 minutos. A condição considera de vazão do canal em relação ao nível da maré foi de 90% de sua capacidade normal.

Foi feita uma análise de sensibilidade para os parâmetro de intensidade da chuva e vazão do canal, onde os seus valores foram alterados a partir da situação real registrada no dia 27/04/2009, enquanto que os valores dos demais parâmetros foram mantidos fixos. O gráfico

da figura 12 mostra que a variável intensidade máxima de precipitação tem um peso significativo sobre o modelo hidrológico, mostrando que quanto maior for a intensidade da chuva maior será o impacto de alagamento e inundação sobre a área da bacia. Os testes realizados indicam que uma variação da ordem de 5mm/h na intensidade da chuva é o suficiente para provocar um aumento da área de alagamento ou inundação entre 0,60 % e 1,90%. A equação da curva de tendência mostra a existência de uma correlação alta entre a intensidade da chuva e a área alagada ($R^2=0,994$). Ensaio realizado com o modelo para avaliar qual seria a intensidade da chuva mínima necessária para causar problema de alagamentos e inundações na bacia apontam para um valor a partir de 7mm/h, mantidas as condições atuais de vazão do canal.

Quanto ao parâmetro vazão máxima do canal, foram testadas variações da ordem de 5m³, sendo que essas alterações provocaram uma redução da área de alagamento ou inundação entre 1,25% e 1,90%. A figura 13, mostra que a correlação entre a vazão máxima do canal e a área alagada ou inundada é da ordem de $R^2=0,996$, semelhante ao da intensidade máxima da chuva, porém, apresentando um efeito inverso, ou seja, quanto maior for a vazão do canal, menor será o impacto sobre a área da bacia.

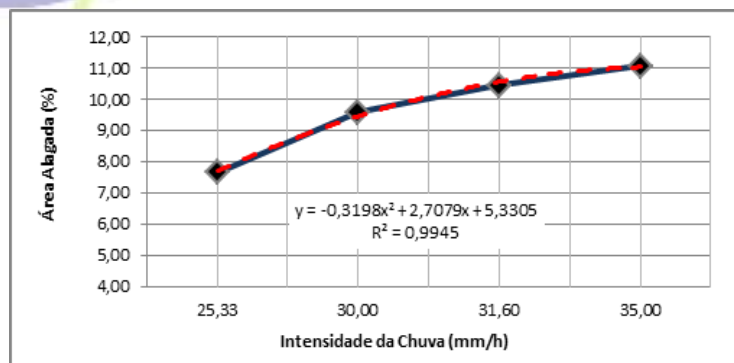


Figura 12: Relação entre a intensidade da precipitação com a área afetada por alagamento e inundação.

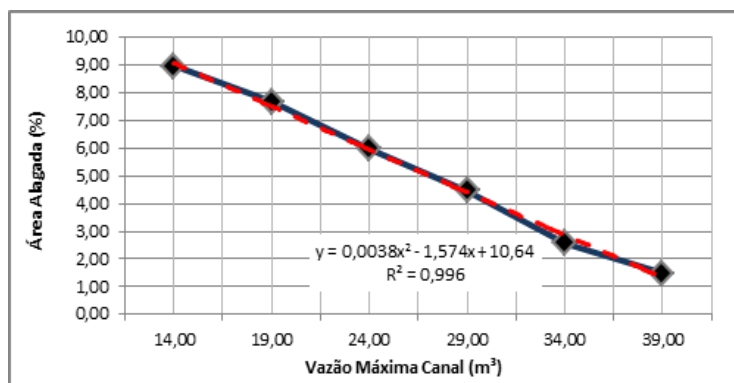


Figura 13: Relação entre a vazão máxima do canal com a área afetada por alagamento e inundação.

Automação do modelo para uso em SIG

O sistema foi automatizado para realizar o processamento das equações do modelo hidrológico e gerar as análises geográficas necessárias apresentando os resultados em forma de mapa de alerta. Para esta finalidade, foi desenvolvida uma interface para entrada de dados, rodar o modelo e gerar o produto final (figura 14). Os dados de entrada necessários para rodar o modelo são os de cunho meteorológico, especificamente, os relacionados com a previsão do tempo de “Nowcasting” geradas pelo radar meteorológico do Sistema de Proteção da Amazônia - SIPAM (intensidade e duração da chuva), pelo modelo hidrológico (vazão de pico do canal principal) e a condição de vazão do mesmo em relação ao nível da maré. Os demais dados: modelo digital de elevação, mapa de uso do solo, tempo de concentração, de pico e de base da bacia, obtidos a partir dos estudos de discretização da bacia, são considerados dados estáticos, ou seja, uma vez calculados só serão revistos quando ao longo do tempo ocorrer alterações físicas na bacia. Os dados do volume precipitado e data do evento pluviométrico são meramente informativos, não são aplicados no cálculo de modelo, entretanto, estão integrados ao sistema, pois são utilizados para compor o boletim de alerta de alagamento e inundação.

49



Figura 14: Interface do sistema de monitoramento de risco de alagamento e inundação para a área do projeto.

Para a determinação da cota de alagamento, é realizado o cálculo do volume que cada célula suporta em relação às demais do seu entorno. Para execução desse processo pelo sistema, foi criada uma rotina automatizada que com base na cota de elevação extraído do modelo digital de elevação e a área correspondente de cada célula da bacia (25m²).

Estudo de caso

A validação do modelo foi realizada a partir da simulação da precipitação registrada para o dia da coleta de dados em campo (27/04/09), e posteriormente aplicado para alguns episódios pluviométricos intensos ocorridos em Belém e que causaram transtornos a população. A seleção e análise desses casos foram realizadas, considerando os eventos que tiveram registros em matérias jornalísticas ou checagem de campo.

50

1º Caso:

Evento pluviométrico registrado pela estação meteorológica do INMET (CEASA) ocorrido no dia 27/04/2009, da ordem de 38 mm, com início às 13h20min e término às 14h40min, duração de 90 minutos e intensidade de 28,7 mm/h.

O nível da maré do Rio Guamá neste dia atingiu seu pico máximo 3,20 m (Nível Médio do Mar) às 13h16min, sendo que ao iniciar a chuva, a maré já havia iniciado o processo de vazante, porém ainda com cota acima de 3,00 m (figura 15). A vazão do canal já havia retomado o sentido normal de seu fluxo (canal-rio). Para efeito da simulação do evento e teste do modelo, foi considerado que a condição de vazão do canal era de 90% de sua capacidade normal, isto devido o nível d'água do mesmo encontrar-se alto influenciado pelo nível da maré.

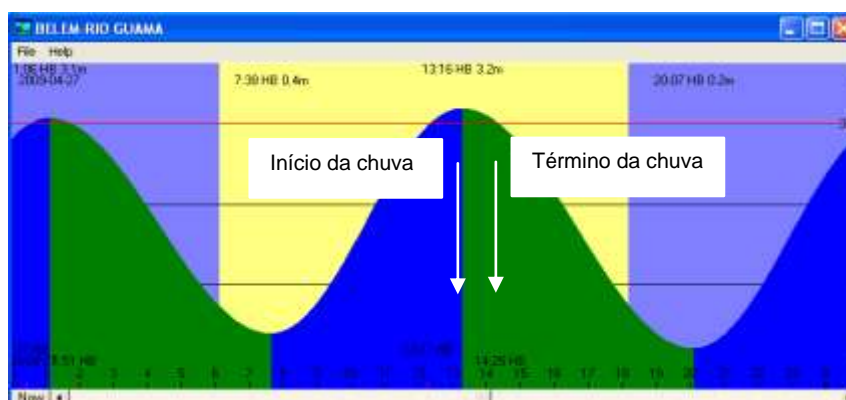


Figura 15: Gráfico do comportamento da maré para o dia 27/04/09.

A figura 16 mostra a interface de entrada dos dados referente ao evento, assim como, o resultado dos cálculos realizado pelo sistema com base nas equações definidas para a modelagem hidrológica.

Figura 16: Interface do sistema e resultados do modelo hidrológico para o evento do dia 27/04/09.

A figura 17 mostra uma área de inundação detectada pelo modelo na Tv. 14 de Março entre a R. Pariquis e R. Mundurucus. Este fato foi decorrente do transbordamento do canal da Tv. 14 de Março constatada em campo conforme mostrado na foto 1.

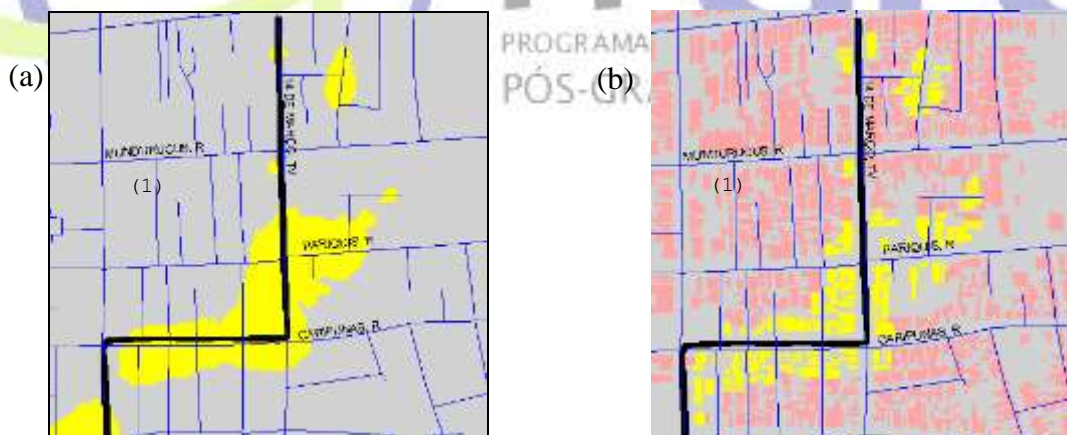


Figura 17: Ponto de inundação (1) detectado através da simulação gerada pela modelagem, onde (a) representa a provável área de abrangência do evento e (b) as prováveis edificações afetadas.



Foto 1: Registro fotográfico da inundação ocorrida na Tv. 14 de Março entre a R. Pariquis e R. Mundurucus decorrente da precipitação ocorrida em 27/04/2009.

2º Caso:

Evento pluviométrico registrado pela estação meteorológica do INMET (CEASA) ocorrido no dia 25/01/2010, da ordem de 27,2 mm, com início as 06h00min e término 10h00min, duração de 240 minutos e intensidade de 19,4 mm/h.

O nível da maré do Rio Guamá neste dia atingiu seu pico máximo 2,50 m (Nível Médio do Mar) as 07h00min (figura 18), uma hora após o início da chuva, porém no horário de maior intensidade da mesma. Entretanto, para efeito da simulação do evento e teste do modelo, foi considerado que a condição de vazão do canal era de 90% de sua capacidade normal devido o fato da maré cheia, o que pode ter reduzido a vazão do canal.

A figura 19 mostra a interface de entrada dos dados referente ao evento, assim, como o resultado dos cálculos realizado pelo sistema com base nas equações definidas para a modelagem hidrológica.

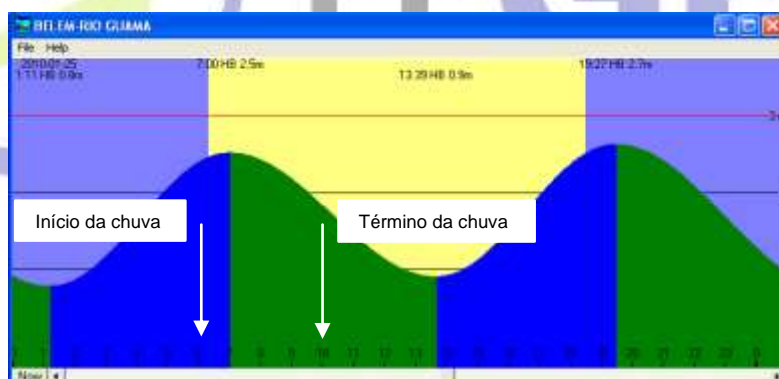


Figura 18: Gráfico do comportamento da maré do dia 25/01/10.

O modelo identifica uma área de inundação detectada na Tv. Quintino Bocaiúva entre a Tv. Tupinambás e Av. Roberto Camelier (1) (figura 20). Este fato foi decorrente do transbordamento do canal da Quintino Bocaiúva e constatada em campo conforme mostrado na foto 2.



Figura 19: Interface do sistema e resultados do modelo hidrológico para o evento do dia 25/01/10.



Figura 20: Ponto de inundação (1) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência do evento e (b) as prováveis edificações afetadas.



Foto 2: Inundação na Tv. Quintino Bocaiúva esquina com a Tv. Tupinambás provocada pela transbordamento do canal.

CONCLUSÃO

O modelo hidrológico aplicado para simular as condições de risco de alagamento e inundação para a bacia hidrográfica de estudo, construído com base em parâmetros meteorológicos (intensidade e duração da precipitação), hidrológico (vazão do canal) e aspectos físicos (dado de altimetria e uso do solo), mostrou-se bastante eficiente nos teste realizados com base nos dados de eventos pluviométricos já ocorridos e checados por meio de registros fotográficos e matérias jornalísticas.

A análise de sensibilidade mostrou que as variáveis do modelo responderam coerentemente a sistema físico da bacia, isto é, quando ocorre um aumento da intensidade máxima da chuva aumentam as áreas alagadas ou inundadas, e também, quando houver um aumento nas condições de vazão do canal haverá uma redução no registro de áreas alagadas ou inundadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRANDÃO, A. M. P. M. Clima urbano e enchentes na cidade do Rio de Janeiro. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs). **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p.47-95: 240.
- BRASIL, Delegacia do Patrimônio da União. **Relatório de demarcação**. Belém: Ministério da Fazenda, 1994.
- COELHO, M.C.N. Impactos ambientais em áreas urbanas – teorias, conceitos e método de pesquisa. In: BRANDÃO, A. M. **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p. 19-45.
- DESCHAMPS, M.V. **Vulnerabilidade socioambiental na região metropolitana de Curitiba**. 2004. 155F. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - UFPR, 2004.
- LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles – o exemplo de São Paulo**. São Paulo: HUCITEC, 1985. 244p.
- MAR da Bahia. Disponível em: <<http://www.mardabahia.com.br>>. Acesso em maio, 2009.
- ONU, Organização das Nações Unidas. **The World at Six Billion**. Disponível em: <http://www.un.org/esa/population/publications/sixbillion/sixbillion.htm>. Acessado em: 22/09/2008.
- PESSOA, M.C.P.Y. et al. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúna: EMBRAPA/CNPMA. v. 8, 1997, 83p.
- PINTO, N. L. DE S. et al. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Editora Edgar Blücher; Rio de Janeiro, 1976.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2000.

_____. Vazões médias in: Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. cap.7, p.113-124.

TUCCI, C.; BERTONI, C. E.M. **Inundações urbanas na América do Sul**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2003.



Artigo Recebido em: 12 de abril de 2013.
Artigo Aprovado em: 14 de junho de 2013.

PPGEO
PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA